Aus dem Physiologischen Institut der Universität München
(Vorstand: Prof. Dr. Dr. Ph. Broemser)

Mechanische Kreislaufveränderungen im Unterdruck.

Inaugural-Dissertation

zur Erlangung der Doktorwürde in der Zahnheilkunde

der Hohen Medizinischen Fakutät

der Ludwig-Maximilians-Universität zu München

vorgelegt von

Karl Weixner
Zahnarzt
aus Deuerling bei Regensburg.

München 1938

Karl Mayer, Buchdruckerei, Günzburg a. D.

Gedruckt mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät der Bayer. Ludwig-Maximilians-Universität zu München.

Referent:

Prof. Dr. Dr. Ph. Broemser.

Tag der mündlichen Prüfung:

22. XII. 1938

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

Meinen lieben Eltern
in Dankbarkeit gewidmet.

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41548311_0056

Die Kenntnis von der Einwirkung sauerstoffarmer Luft auf die menschlichen Organsysteme ist im eigentlichen Sinne schon über 4 Jahrhunderte alt, doch haben erst die Methoden der modernen Physiologie die wissenschaftliche Grundlage zu den exakten Erforschungen der einzelnen Beziehungen gebracht. Es ist ein weiter Weg von den Beobachtungen Acosta's über die Bergkrankheit zu Ende des 16. Jahrhunderts bis zu den wissenschaftlichen Erkenntnissen unserer neuzeitlichen Höhen- und Luftfahrtforschungsinstitute und erst in den letzten Dezennien des 19. Jahrhunderts haben die systematischen Erforschungen die mehr oder weniger empirisch gewonnenen Erfahrung abgelöst.

Der oben genannte Forscher, ein spanischer Jesuit, soll der erste gewesen sein, der sich mit der Einwirkung der Höhenluft auf den menschlichen Organismus befaßt hat. Vor allem die hohen Gebirgsketten Mittel- und Südamerikas, die damals von den Europäern zum erstenmal bestiegen wurden, haben diese Erfahrungen geliefert. Es waren ja in dieser Zeit nur Bergsteiger und Naturforscher, die bei ihren Erkundungsfahrten in bis dahin unbekannte Gebiete und Höhen diese Erkenntnisse sammelten. So berichtet De Saussure von den Ergebnissen seiner ersten Montblancbesteigung (1787), Hugi von den Erfahrungen anläßlich der Ersteigung des Finsteraarhorns. Von J. Wood sind die Ergebnisse seiner Himalayafahrt aus den Jahren 1836—1838 bekannt und Burksch berichtet von seinem Aufenthalt im Pamir (1870).

Alle diese Ergebnisse mußten sich naturgemäß auf die ohne instrumentelle Hilfsmittel gemachten Erfahrungen beschränken, also auf Puls und Atmung. Erst um die Mitte der 70er Jahre des letzten Jahrhunderts beginnen die wirklich wissenschaftlichen Erforschungen und da ist es in erster Linie der Franzose P. Bert, der in seinen Laboratoriumsversuchen über die Einwirkung von Luftverdünnung und Sauerstoffmangel auf den Organimsus die Grundlage der Erkenntnisse auf diesem Gebiet geschaffen hat. Der Bau pneumatischer Kammern, in denen die anderen Faktoren des bis dahin benützten Höhenklimas ausgeschaltet werden konnten schuf erst die Möglichkeit die Wirkung von Luftverdünnung und Sauerstoffmangel allein auf die Organe zu untersuchen.

Die Versuche Berts bewiesen klar, daß der verminderte partielle Sauerstoffdruck in den Lungen die Ursache der Bergkrankheit war. Der englische Bergsteiger und Arzt Longstaff vertrat eine andere Ansicht und zwar beruht nach ihm die Bergkrankheit auf einem Zusammentreffen von körperlicher Anstrengung, Ungewohntheit und Nahrungsmangel. Sein berühmter Landsmann Barcroft tritt aber dieser Ansicht entgegen und erzählt ein drastisches Erlebnis von einer Eisenbahnfahrt über die südamerikanischen Anden, die den Beweis erbringt, daß die Erscheinungen der Bergkrankheit primär auf den verminderten Atmosphärendruck der Luft zurückzuführen ist: „Ich muß gestehen, daß ich, als ich das erstemal über diese Höhe fuhr, zu tun hatte, mich vollkommen ruhig zu verhalten, um nicht selber krank zu werden, — eine Anstrengung, die sich als nutzlos erwies, denn wenn ich auch im Zuge nicht richtig krank wurde, so kam die Krisis doch zwei oder drei Stunden später als ich in 3670 m Höhe ausstieg. Bei meinem zweiten Uebergang war ich besser imstande meine Mitreisenden zu beobachten. Als ich in Ticlio aus dem Zuge sah, bot sich mir der erstaunlichste Anblick. Längs des ganzen Zuges waren die Abteilfenster besetzt von οἱ πολλοί und eine Reihe von Köpfen hing aus den Fenstern heraus, als äußeres und sichtbares Zeichen eines einzigen Zweckes, nämlich des Erbrechens".

Mosso glaubt darin die Ursache der Bergkrankheit zu sehen, daß in der in großen Höhen ausgeatmeten Luft weniger Kohlensäure enthalten wäre als gewöhnlich. Diese Theorie der Akapnie wurde aber bald abgelehnt und Mosso selbst hat später seine Ansicht revidiert.

Auf den Ergebnissen der Bert'schen Untersuchungen fußend haben dann die späteren Forscher weitergearbeitet. Loewy hat eingehende Untersuchungen zur Klärung der Beziehungen der Luftverdünnung und des Sauerstoffmangels einerseits und der Organe andererseits angestellt und die Versuche in der pneumatischen Kammer von Haldan, Hasselbach, Linhard und vieler anderer Forscher ergänzten und erweiterten sie.

Mit der Entwicklung des modernen Flugwesens ergaben sich neue und dankbare Aufgaben für diese Untersuchungen, die damit nicht nur ein wissenschaftliches sondern in erhöhtem Maße ein praktisches Interesse erregen.

Wirkung auf Puls.

Wohl am meisten von allen am Kreislauf beteiligten Faktoren wurde die Pulsfrequenz bei der Einwirkung sauerstoffarmer Luft untersucht, da sie nicht nur am leichtesten, son-

dern — und das trifft vor allem auf die älteren Untersuchungen zu — ohne instrumentelle Hilfsmittel beobachtet werden konnte. Bei der Durchsicht der älteren Bestimmungen der Einwirkung des Sauerstoffmangels auf den Puls fällt die große Meinungsverschiedenheit unter den einzelnen Autoren auf. Die meisten Forscher beobachten eine Pulsbeschleunigung, einige wollen eine Herzschlagerniedrigung festgestellt haben und wieder andere glauben, daß eine Einwirkung fast gar nicht zu erkennen wäre.

Diese auf den ersten Blick etwas sonderbaren Ergebnisse lassen sich aber erklären, wenn man bedenkt, wie individuell verschieden die einzelnen Versuchspersonen auf die Einwirkung der gesamten Höhenklimafaktoren reagieren und unter welchen Voraussetzungen die älteren Untersuchungen gemacht wurden. Sie sind auch deswegen so unterschiedlich in ihren Ergebnissen und daher für unsere heutigen Anforderungen nicht verwertbar, weil sie nach aktiven körperlichen Anstrengungen gemacht wurden, die ein Aufstieg mit sich bringt, und die Nachwirkung körperlicher Arbeit in Höhenlagen viel intensiver ist als im Flachland.

Es ist sehr schwierig, genaue Feststellungen über die Höhe beziehungsweise über die Größe des Unterdruckes zu machen, in denen Pulsveränderungen auftreten, da die individuelle Verschiedenheit der Versuchspersonen zu groß ist. Voraussetzung für einigermaßen brauchbare Untersuchungen in dieser Richtung ist, daß sie unter den Bedingungen der äußersten Ruhe gemacht werden. Das ist vor allem dann der Fall, wenn die Untersuchungen morgens ausgeführt werden, kurz nach dem Erwachen der Versuchsperson, also zu einem Zeitpunkt, wo der Mensch durch einen gesunden Schlaf gestärkt weder körperlicher noch seelischer Hemmungen ausgesetzt ist. Für die Beurteilung der Ergebnisse ist ferner noch wichtig, ob die Versuchsperson an die Höhe gewöhnt ist oder nicht, denn die Akklimatisation an die Höhenluft spielt eine große Rolle.

Die Untersuchungen unter diesen Voraussetzungen zeigen fast durchwegs eine mehr oder weniger starke Pulsbeschleunigung.

Jaccoud, Egger und Veragouth fanden Erhöhung der Pulsfrequenz bei Touristen in den Hochtälern des Engadins und von Arosa,, die 1800 m über dem Meeresspiegel liegen. Zuntz, Loewy, Müller und Caspary konnten schon in 500 m Höhe eine Pulserhöhung gegenüber Berlin nachweisen, während Durig erst in einer

Höhe von 3000 m eine Herzschlagsteigerung feststellen konnte. Barcroft sagt: Zweifellos drückt sich in Höhen über 3000 m die Höhenwirkung beim ruhenden nicht akklimatisierten Menschen in einer Beschleunigung des Pulses aus. Auch Ewig und Hinsberg haben bei ihren Untersuchungen, die grundsätzlich morgens nüchtern im Bett einige Zeit nach dem Erwachen vorgenommen wurden, in allen Fällen eine erhebliche Zunahme des Pulses beobachten können, die am ersten Morgen 4½% im Durchschnitt betrug und dann wieder langsam bis fast auf den Normalwert zurückging. Das Bemerkenswerte an ihren Untersuchungen war, daß es dabei gleichgültig war, ob die Versuchspersonen trainiert waren oder nicht.

Gebr. Loewy und L. Zuntz haben anläßlich einer Expedition im Schweizer Hochgebirge ihre Ergebnisse in einer Tabelle zusammengefaßt, die mir gestattet sei, hier anzuführen.

Ort und Datum	Höhe m	bei A. L.	bei I. L.	bei L. Z.	Bemerkungen
Berlin, 6.—9. 8.	34	64	60	60	
Brunnen, 27. 8.	—	66	90	—	
Col d'Olen 10. 8.	2900	78—84	72—78	88	Am Morgen nach dem Aufstieg
Gnifettihütte 17. 8.	3700	76—80	86—88	80—84	Am Morgen nach dem Aufstieg
Gnifettihütte 19. 8.	3700	74	58—60	80	
Gnifettihütte 20. 8.	3700	68	—	68	Nach 8täg. Aufenthalt auf Col d'Olen

Einen anderen Maßstab muß man bei den an die Höhe akklimatisierten Menschen anlegen.

Barcroft hat an sich und seinen Mitarbeitern Akklimatisationsversuche unternommen und dabei — vorausgesetzt war natürlich absolute Ruhe — festgestellt, daß sich bei den an die Höhe von 4360 m langsam gewöhnten Versuchspersonen gegenüber der Pulsfrequenz am Meeresspiegel wenig oder gar nichts geändert hat, ja sogar eine wesentliche Herabsetzung der Herzschlagzahl sehen konnte. Aber auch er läßt die Frage nach der Wirkung noch größerer Höhen offen.

Hingston berichtet von einem an die Höhe ganz besonders gewöhnten Teilnehmer seiner Himalayaexpedition aus dem Jahre 1924 und stellt in der folgenden Tabelle die bemerkenswerten Ergebnisse zusammen.

Tabelle 2.

Pulszahl eines Mitgliedes der englischen Mount-Everest-Expedition.

Höhe in m	Pulszahl in der Minute sitzend	Pulszahl in der Minute stehend	Pulszahl i. d. Minute nach körperl. Arbeit	Zeiteinheit in Sek. bis der Puls wieder normal wird
0	72	72	84	20
2100	72	84	96	15
4350	72	84	108	40
5050	72	96	120	20
6400	108	120	144	20

Mosso hat bei berggewohnten italienischen Soldaten eine wenn auch nur geringe Erhöhung der Herzschlagzahl festgestellt und gezeigt, daß der Grad der Anpassung an die Höhe eine wesentliche Rolle spielt.

Hartmann hat an mehreren seiner Kameraden bei der Deutschen Himalayaexpedition 1931 bis zu einer Höhe von 7360 m Pulsfrequenzmessungen ausgeführt, die sich auf Werte, die bei absoluter Ruhe gefunden wurden, beziehen. Während bei einem Teilnehmer die Herzschlagzahl bis zu etwa 6000 m nur eine geringe Zunahme gegenüber den Werten in Meereshöhe zeigte, daß Hartmann bei zwei anderen Kameraden sogar ein langsames Sinken der Pulsfrequenz bis zu einer Höhe von 4500 m beobachten können. Erst in einer Höhe von 6000 m konnte auch er wie Hingston eine erhöhte Steigerung der Herzschlagzahl erkennen. Hartmann schreibt: „Es ist sicher daß der Puls auch in absoluter Ruhe und bei maximaler Akklimatisation bei Uebersteigung einer bestimmten Höhe beschleunigt wird. Es muß dann ein Punkt erreicht sein, wo auch schon in völliger Ruhe der Sauerstoffmangel den Organismus zu einer kompensatorisch wirkenden Pulsbeschleunigung veranlaßt."

Die hier in großen Höhen unter absoluten Ruhebedingungen gewonnenen Werte werden bestätigt und erweitert durch Untersuchungen in der pneumatischen Kammer, die zeigen, daß die Luftverdünnung und dadurch der Sauerstoffmangel der bestimmende Faktor für die Pulsfrequenz ist. Freilich ist

die Luftverdünnung die wichtigste Eigenschaft des Höhenklimas, doch darf man die Unterdruckkammer und das Höhenklima nicht für gleich in ihrer Wirkung halten, da die komplizierten Faktoren des Höhenklimas in anderer Weise auf den Kreislauf einwirken als die isolierte Luftverdünnung in der pneumatischen Kammer. Auf jeden Fall bilden die Untersuchungen in der Unterdruckkammer wertvolle Ergänzungsergebnisse.

P. Bert und Mosso benützten zu ihren Versuchen neben dem Höhenklima auch die Unterdruckkammer und fanden die Begründung für die Erhöhung der Pulsfrequenz durch den Mangel an Sauerstoff darin, daß sie durch Zufuhr von Sauerstoff die alten Beziehungen wieder herstellten und die Erscheinungen der Anoxämie dadurch beseitigten.

Daß Luftverdünnung, die einer Höhe von 1000 m entspricht, schon eine Steigerung der Herzschlagzahlen bringt, stellte v. Liebig fest. Hasselbach hat in seinen Versuchen, die in der Unterdruckkammer über eine lange Zeitdauer hinweg gemacht wurden, zeigen können, daß sich zu Beginn ein Steigen der Pulsfrequenz bemerkbar macht die allmählich dann wieder zum Ausgangspunkt zurückgeht. Borgards Versuche in der Unterdruckkammer ergaben ebenso eine Erhöhung der Herzschlagzahl und zwar bezeichnet Borgard diese Zunahme wegen ihrer Gesetzmäßigkeit als logarithmische Funktion des Unterdruckes.

Muskeltätigkeit kann schon im Tiefstand zu einer erheblichen Erhöhung führen und diese Tatsache wirkt sich erst recht aus in Höhen mit Sauerstoffverminderung und Luftverdünnung. So berichtet Kronecker von Versuchspersonen die auf das Zermatter Breithorn hinaufgetragen wurden und dann 20 Schritte auf dem mäßig geneigten Schneefeld gingen. Bei dieser gewiß nicht anstrengenden Tätigkeit, die im Flachland kaum eine minimale Aenderung gebracht hätte, erhöhte sich die Herzschlagzahl von 106 auf 140—144. Loewy beschreibt, wie sich bei ihm die Pulsfrequenz auf 160—176 Schläge gesteigert hat, als er einmal eine Wanderung auf den bayrisch-tiroler Bergstrassen unternahm, während die gleiche Marschleistung im Flachland eine Erhöhung seiner Herzschlagzahl nur auf 100—120 erwirkte. Daß schon eine ganz geringe Arbeitsleistung in größeren Höhen eine wesentliche Pulsbeschleunigung mit sich bringt, zeigt die Tatsache, daß auf der Monte Rosaspitze Zuntz beim Aufsitzen 92—108 Pulse hatte gegen 80 im Liegen. Bei Loewy war das Verhältnis 110— zu 84 und bei Caspary 96 zu 66.

Zusammenfassend ist festzustellen, daß die Einwirkung sauerstoffarmer Luft auf die Pulsfrequenz in einer Steigerung derselben beruht. Je stärker die Druckverminderung und dadurch der Sauerstoffmangel ist, desto erheblicher ist die Zunahme der Herzschlagzahl. Der kritische Punkt für die regelmäßig eintretende Pulserhöhung scheint etwa in einer Höhe von 4500 m zu sein. Individuelle Verschiedenheiten werden natürlich diese Gesetzmäßigkeit mehr oder weniger durchkreuzen.

Die physiologische Begründung dieser Erscheinung liegt nach Loewy in einer Reizung des Herzzentrums durch Sauerstoffmangel. Hemmung des Vagus oder Erregung des Sympathikus ist nach ihm für die Steigerung der Pulsfrequenz verantwortlich. Borgard's Tierversuche ergaben, daß die Erhöhung der Herzschlagzahl durch die Abnahme des physiologischen Vagustonus bedingt ist. Bei seinen Versuchen kommt er zu der Einteilung der Wirkungserscheinungen sauerstoffarmer Luft in drei Phasen:

Phase I.	Phase II.	Phase III.
Abnahme des Vagus und Akzeleratorenzentrums.	Zentrale Heizung des Akzelerans und Vagus	Zentrale Lähmung des Akzelerans Direkte Herzwirkung

Die Pulszahl steigt allmählich an, die Kurve wird immer steiler um beim Erreichen der kritischen Höhe plötzlich scharf abzufallen. Diese Phase I bis zum plötzlichen Abfall ist gekennzeichnet durch die ‚Abnahme des physiologischen Vagustonus'.

Wirkung auf den Blutdruck.

Eine gewisse Gesetzmäßigkeit, wie man sie bei der Untersuchung der Pulsfrequenz trotz einiger widersprechender Ergebnisse hat feststellen können, läßt sich bei den Untersuchungen der Blutdruckveränderungen nicht erkennen, obwohl auch auf diesem Gebiet eine Unmenge von Beobachtungen und Versuchen vorliegen. Leichte Schwankungen im Blutdruck — sei es nun nach oben oder nach unten — sind für einen großen Teil der Versuchsergebnisse über die Einwirkung sauerstoffarmer Luft auf den Blutdruck charakteristisch.

Von den älteren Ergebnissen sind die von P. Bert zu nennen. P. Bert gab als Ergebnis seiner Untersuchungen über den Blutdruck an, daß dieser bis zu einer Verdünnung auf fast ½ Atmosphärendruck konstant bleibt. Fränkel und Geppert fanden, daß der Blutdruck erst unter dem Einfluß einer lebensbedrohenden Sauerstoffherabsetzung verändert wird.

Lazarus und Schirmunski haben an Tierversuchen eine deutliche Tendenz zum Sinken des Blutdruckes gesehen und haben auch bei Versuchen an Menschen, die unter der Einwirkung der Luftverdünnung um ½ Atmosphäre standen, ein Absinken der Blutdruckwerte um 25—30 mg. Hg. festgestellt. Lüscher fand bei drei Personen auf dem Jungfraujoch eine Blutdrucksteigerung, die vor allem bei den älteren Versuchspersonen ziemlich hoch war und bei einem 58jährigen Mann sogar 45 mm erreichte. Auch Ewig und Hinsberg haben bei ihrer Expedition auf das Jungfraujoch bei ihren Versuchspersonen eine geringe Erhöhung des systolischen sowie des diastolischen Blutdruckes feststellen können und zwar schwankt der erhöhte Druck in den ersten 3 Tagen zwischen 2—12 mm, geht dann wieder zurück und bleibt um ein Geringes über den Normalwerten.

Im Gegensatz zu diesen Ergebnissen stehen die Versuche von Haldane und seinen Mitarbeitern auf Pikes Peak, die ein Absinken des systolischen Blutdruckes unter die Norm ergaben. E. Koch fand bei seinen Tierversuchen in der Unterdruckkammer anfangs wohl ein geringfügiges Absinken des Druckes oder keinerlei Veränderungen desselben, doch bei stärkerer Luftverdünnung sah er auch ein Ansteigen der Blutdruckwerte. Das gleiche Ergebnis zeitigen die Untersuchungen von Herbst, der erst bei einem Druck von 477 mm eine geringe Aenderung gegenüber dem Normalen sieht und zwar steigt der systolische Blutdruck während der diastolische Druck die Tendenz zum leichten Abfallen hat. Großmann findet bei einigen Versuchspersonen in Davos eine geringe Erhöhung des Blutdruckes, die in Höhen von 2500 m (556 mm Hg) bis 3500 m (488 mm Hg) noch deutlicher wird. Auch er beobachtet, daß bei Personen über 40 Jahren die Blutdrucksteigerung häufiger und stärker auftritt als bei Jüngeren, gleichzeitig aber auch, daß nach längerem Verweilen in dieser Höhe die Blutdrucksteigerung auf den Ausgangspunkt zurückgeht.

Sehr eindrucksvolle Versuchsreihen stammen von W. Schwarz aus dem Hamburger Institut für Luftfahrtmedizin. Ueber die Versuchsanordnung schreibt Schwarz: „Die Versuchsperson saß während der Untersuchung in bequemer Haltung an einem Tisch. Vor Beginn der Druckerniedrigung wurde die Versuchsperson über den Verlauf der Untersuchung kurz unterrichtet und mit dem Sauerstoffgerät vertraut gemacht. Außerdem wurde auf die absolute Ungefährlichkeit der Kammeruntersuchung hingewiesen. Nach etwa 10 Minuten ruhigen Sitzens wurden die ersten Messungen ausgeführt. Die

Armmanschette ist mit einem Quecksilberschwimmermanometer und mit einer Sauerstoffbombe verbunden. Der Untersucher reguliert mittels Reduzierventil den Manschettendruck so ein, daß der Zeiger des Schwimmers um den gefundenen Wert pendelt. Der systolische Wert wird dabei palpatorisch an der Art. radialis bestimmt. Nach einigen Messungen im Normaldruck wurde der Druck in der Kammer innerhalb 8—10 Minuten auf 374 mm Hg. (5500) erniedrigt. In einer Höhe von 5500 m, 6000 m, 6500 m, und 7000 m wurde der Druck dann jedesmal 5 Minuten konstant gehalten. Jeder Anstieg von 500 m dauerte etwa eine halbe Minute. Die Ergebnisse verschiedener Versuchsreihen von Schwarz sowohl an Fliegeranwärtern als an Studenten und Studentinnen sind z. T. übereinstimmend z. T. wieder stark voneinander abweichend. So zeigen die Blutdruckmessungen bei den Versuchspersonen die vorzeitig kollabierten folgendes Bild: ‚Geringer Anstieg des systolischen Blutdruckes während des Aufstieges oder bei einigen Personen Konstantbleiben. Abfall des Blutdruckes bei 5500 — 6000 m. Bei Blutdruckabfall folgt zumeist in kurzer Zeit ein schwerer Kollaps mit Blässe der Haut, Pulslosigkeit und Ohnmacht.‘ Auch bei den Versuchspersonen ohne Kollapserscheinungen zeigt sich zu Beginn und während des Aufstieges eine geringe Blutdrucksteigerung, über 5500 m jedoch ein Abfallen von 10—15 mm Hg. Bei einigen Versuchspersonen gehen die Blutdruckwerte auch etwas unter den Normalwert, während wieder bei anderen auch von dieser Höhe aus ein weiteres Ansteigen zu bemerken ist.

Nach Schneider gibt es 3 Arten der Aenderungen im Verhalten des Blutdruckes bei Sauerstoffmangel. I. Der systolische und diastolische Blutdruck bleibt gleich oder er steigt etwas an. II. Während der systolische Blutdruck ansteigt, fällt der diastolische ab. III. Bei schlechter Verträglichkeit fällt der diastolische Blutdruck frühzeitig ab und bald folgt dann auch der systolische.

Borgard schreibt: ‚Bis zum Verschwinden des reflektorischen Vagustonus bleibt der Blutdruck abgesehen von leichten Schwankungen im wesentlichen konstant. Wird aber durch Pressorezeptorenausschaltung der latente Konstrictorentonus manifest, so sinkt der Blutdruck in der gleichen Weise ab, wie die Herzfrequenz bei erhaltenen Pressorezeptoren ansteigt. (Herabsetzung von Vagus- und Constrictorentonus durch Anoxämie). Mit Beginn der zentralen Reizung des Constrictorenzentrums steigt der Blutdruck gleichzeitig mit Auftreten der Vaguspulse bis zur Lähmung der Zentren an.

Hierauf erfolgt ein rapider Bultdrucksturz bis zum Nullwert.

Nach Besserer soll man trennen zwischen dem Verhalten des Blutdruckes in Höhen bis zu 3000 m und in großen Höhen (6000). Im ersteren Fall bleibt der systolische Druck gleich oder sinkt etwas ab. Der diastolische Blutdruck bleibt fast immer gleich oder kann unter Umständen geringen Schwankungen ausgesetzt sein. In größeren Höhen kommt es nach Besserer ,ohne Ausnahme zum Absinken des diastolischen Druckes, der systolische Druck dagegen kann lange Zeit konstant bleiben, meistens aber hat er die Tendenz zum Steigen. Kommt es wider Erwarten zu einer starken Senkung des systolischen Blutdruckes, so besteht die Gefahr, daß ein Kollaps eintritt.

Loewy hat den Blutdruck vergleichend im Tiefland, in Davos (1550), auf Muottas Muraigl (2450) und auf dem Jungfraujoch (3450) bei mehreren jüngeren Personen und einem älteren Mann bestimmt. Bei der älteren Person stieg der Blutdruck schon in Davos um 20—25 mm Hg., bei einem jüngeren Manne ebenso um 30 mm Hg. Auf Muottas Muraigl zeigte sich bei dem älteren Manne eine Steigerung um 40 mm Hg.

Daß es sich bei der Blutdrucksteigerung um die Wirkung des Sauerstoffmangels handelt, kann man dadurch beweisen, daß durch Sauerstoffatmung die Blutdrucksteigerung rückgängig gemacht werden kann.

Nach Loewy kommt die Blutdrucksteigerung mit zunehmender Höhe durch den Sauerstoffmangel im Vasomotorenzentrum zustande, wodurch eine zentrale Erregung im Sinne einer Vasoconstrictorenwirkung hervorgerufen wird. Die verminderte Elastizität der Kapillaren bei älteren Leuten, sowie beginnende sklerotische Prozesse an den Präkapillaren würden den Sauerstoffübertritt in das Vasomotorenzentrum erschweren.

Wirkung auf das Herzminutenvolumen.

Der wichtigste Faktor des Kreislaufsystems ist das Herzminutenvolumen, das Produkt aus Pulsfrequenz und Schlagvolumen. Auch bei der Durchsicht der Untersuchungen über die Wirkung sauerstoffarmer Luft auf das Herzminutenvolumen fällt die Verschiedenheit in den Ergebnissen auf. Diese Gegensätzlichkeit der Resultate ist aber erklärlich, wenn man sich die technischen Schwierigkeiten der Bestimmung des Herzminutenvolumens am Menschen vergegenwärtigt, die geringe Veränderungen nie mit absoluter Sicherheit feststellen lassen werden.

Methoden zur Bestimmung des Herzminutenvolumens.

Durch Messung der Blutstromgeschwindigkeit versuchten Volkmann und Vierordt das Herzminutenvolumen und Schlagvolumen zu bestimmen. Kürschner will das Schlagvolumen aus dem Rauminhalt der Herzkammern finden. Zuntz mißt es unter Verwendung des Blutdruckes in der Aorta, dann versuchten Zuntz und Hagemann aus dem Gasgehalt des arteriellen und venösen Blutes combiniert mit einem Respirationsversuch das Schlagvolumen zu bestimmen. Der Gedankengang der Plesch'schen Methode ist folgender: Wenn man einerseits den Sauerstoffgehalt des arteriellen und venösen Blutes ermittelt und andererseits die in der Zeiteinheit überhaupt verbrauchte Sauerstoffmenge kennt, kann man rechnerisch die Gesamtblutmenge, die nötig war den aufgenommenen Sauerstoff zu transportieren, bestimmen. Diese Menge mußte in der Zeiteinheit die Lunge passieren und vom Herzen befördert werden. Nimmt man als Zeiteinheit die Minute, so erhält man das Herzminutenvolumen. Die Teilung durch die Pulszahl ergibt dann das Schlagvolumen. Diese Plesch'sche Methode arbeitet mit großen Fehlerquellen, denn es ist technisch nicht möglich, während einer Kreislaufzeit durch Mischung und Diffusion die ganze Lungenluft so gleichmäßig zu verteilen, daß die zu analysierende Expirationsluft gleich der Alveolarluft ist. Ueberhaupt sind die alten Methoden zur Bestimmung des Herzminutenvolumens mit starker Ungenauigkeit belastet.

Einen Fortschritt in der Genauigkeit der Berechnungen brachte die Grollmann'sche Acetylengasmethode.

Die Herzminutenvolumenbestimmung nach Brömser und Ranke ist sehr genau.

$$V = \frac{Z_F \,.\, Q \,.\, S \,.\, T \,.\, \left(\frac{p_s + p_i}{2} - p_d\right)}{D \,.\, \varsigma \,.\, c}$$

In dieser Formel zur unblutigen Bestimmung des Herzminutenvolumens ist: V = Schlagvolumen, Q = Querschnitt der Aorta ascendens ps = systolischer pd = diastolischer Druck, pi = Druck unmittelbar hinter der Incisur (alle Drucke in der Aorta ascendens gemessen) S = Systolendauer, D = Diastolendauer, T = Pulsdauer, ς = Dichte des Blutes, c = Pulswellengeschwindigkeit in der Aorta, ZF = Zahlenfaktor.

Das Herzminutenvolumen ist die wichtigste Größe für die dynamische Beurteilung des Kreislaufes. Mit zunehmender

Höhe wird die arterielle Sauerstoffsättigung immer niedriger. Sie fällt entsprechend der alveolären Sauerstoffspannung. Die Anoxämie ist nach Haldane ein Zustand, bei dem der Sauerstoffpartiardruck, die Menge des freien Sauerstoffes im Blute, abnorm gering ist. Sie tritt ein, wenn bei unverändertem Barometerdruck der Sauerstoffprozentgehalt der Einatmungsluft sinkt oder wenn bei gleichem Sauerstoffprozentgehalt der Barometerdruck stark verringert ist. Um nun die notwendige Versorgung der Gewebe mit Sauerstoff zu sichern, bedient sich der Körper in erhöhtem Maße der Beanspruchung der Atmung und der Zirkulation. Die kompensatorisch eintretende Vergrößerung des Herzminutenvolumens ist abhängig von den Veränderungen der Frequenz und des arteriellen Druckes. Wichtig ist die Tatsache, daß das Absinken der arteriellen Sauerstoffsättigung mit einer Erhöhung des Herzminutenvolumens beantwortet wird, falls nicht krankhafte Erscheinungen am Herzen selbst den Eintritt dieser kompensatorischen Tätigkeit verwehren.

Douglas, Haldane, Henderson und Schneider haben auf ihrer Expedition auf den Pikes Peak (4300) das Herzminutenvolumen mit Hilfe des Amplitudenfrequenzproduktes berechnet. Diese unsichere Methode ergab eine geringe Vergrößerung des Herzmimutenvolumens. Kuhn sah mit der Plesch'schen Methode in einer Höhe von 3277 m eine geringe Erhöhung des Herzminutenvolumens. Barcroft bestimmte in den Anden (4300) das Minutenvolumen mit der Methode der dreifachen Extrapolation und mit der Methode nach Meakins. Bei der Anwendung der ersten Methode sank das Herzminutenvolumen von 5,1 Liter in Meereshöhe auf 4,1 Liter in Cerro de Pasco bei der einen Versuchsperson, bei der anderen von 5,2 Liter auf 4,7 Liter. Nach der Meakins'schen Methode jedoch war eine Steigerung von 5,3 auf 6,4 sowie von 7,8 auf 9,6 Liter festzustellen. Auf dem Pikes Peak fand Grollmann mit seiner Accetylenmethode eine Vergrößerung bis zu 47 %, die aber nach 14 Tagen der Akklimatisation wieder zurückging. Harrison und Blalock sahen schon bei kurzdauernder Hypoxämie beträchtliche Erhöhungen des Herzminutenvolumens und zwar fast parallel mit dem Sinken der arteriellen Sauerstoffsättigung. Gollwitzer-Meyer fand bei ihren Versuchen bei einer Sauerstoffsättigung des Blutes von 80 % eine erhebliche Steigerung des Schlag- und Herzminutenvolumens. Talenti fand im Unterdruck (5000 m) einen Anstieg von 7,4 Liter bezw. 6,9 Liter auf 10,8 bezw. 9,7 Liter.

Nach Herbst und Manigold sind bis zu einem Unterdruck von 477 mm Hg. (3700 m) wenig oder gar keine Veränderungen des Herzminutenvolumens, sowie auch des Schlagvolumens der Pulszahl und des Blutdruckes zu sehen. Das erklärt sich dadurch, daß die Sauerstoffsättigung des Blutes erst bei einer bereits beträchtlichen Verminderung des Sauerstoffpartiardruckes so gering wird, daß ein fühlbarer Sauerstoffmangel im Gewebe entsteht. Erst von einer Grenze von 477 mm Hg. ist eine beträchtliche Erhöhung des Herzminutenvolumens festzustellen.

Hasselbach und Lindhard haben bei ihren Versuchen in der Unterdruckkammer wohl kleine Erhöhungen des Herzminutenvolumens beobachtet, glauben aber, daß andere Einflüsse als der Sauerstoffmangel, wahrscheinlich solche nervöser Natur, speziell vasomotorischer Natur, in so überragender Weise die Funktion beherrschen, daß die direkte Bedeutung des Sauerstoffmangels so verschwindend klein ist, daß der Nachweis seiner Wirkung nicht gelingt.

Die Messung des Schlagvolumens nach Brömser und Ranke zusammen mit der Methode von Wezler und Böger zur Beurteilung des Vasomotorenzustandes benützt Ranke bei seinen Untersuchungen, deren Mittelwertsergebnisse eine Erhöhung der Pulsfrequenz, des Herzminutenvolumens und des Schlagvolumens bringen. Die Erhöhung wird nach ihm erreicht entweder durch Zunahme des Vasomotorentonus (Erhöhung der Arteriendehnbarkeit) oder durch Erhöhung der Blutdruckamplitude.

Durch Entleerung der Blutspeicher — Leber, Milz, abdominale Venengebiete und der subpapilläre Plexus der Haut — kommt es zur Erhöhung der zirkulierenden Blutmenge und als Folge dieser vermehrten Blutmenge sieht Schubert eine erhöhte Leistung des Herzens gegenüber der Norm: Das Herzminutenvolumen steigt an.

Aus der folgenden Tabelle sind die einzelnen Veränderungen des uns hier angehenden Kreislaufkomplexes zu ersehen. Auch die Akklimatisation an die Höhe auf dem Jungfraujoch ist bei dieser Zusammenstellung berücksichtigt.

Tabelle III. aus: Ewig und Hinsberg:
Kreislaufstudien im Hochgebirge.

	Freiburg	Jungfraujoch	
		aml. u. 2. Tage	nach 8—14 Tagen
Höhe ü. d. M.	270 mm	3460 m.	
Luftdruck	740 mm	500 mm.	
Sauerstoff-spannung der Luft	154 mm	104 mm.	
Pulszahl	60	68	62
Blutdruck	110/75 mm Hg.	118/78	112/75
Minutenvol.	4,5 L	5,75 (+28 %)	5,1 (+14 %)
Schlagvol.	75 ccm	85 ccm.	82 ccm.
Herzarbeit pro Minute	7,1 mkg.	9,2 mkg.	8,1 mkg.
Zirkulierende Blutmenge	4,9 L	5,2 L	5,05 L

Die Erhöhung des Herzminutenvolumens ist nach Ewig und Hinsberg eine großartige Kompensationsvorrichtung durch die der Großteil des fehlenden Sauerstoffes in den Geweben ausgeglichen wird, denn je schneller das Blut durch die Peripherie des Körpers kreist umso weniger Sauerstoff braucht das Gewebe aus der Einheit des arteriellen Blutes zu entnehmen um seinen Sauerstoffbedarf zu decken. Zu dieser kompensatorischen Erhöhung des Herzminutenvolumens kommt nun noch die Zunahme des Hämoglobins und der zirkulierenden Blutmenge, wodurch die Sättigung der sauerstoffarmen Gewebe noch mehr ermöglicht wird.

Bei körperlicher Arbeit steigt das Herzminutenvolumen in großen Höhen viel stärker an als im Flachland. Ewig und Hinsberg fanden bei ihren Versuchen auf dem Jungfraujoch, daß bei einem 300 prozentigen Sauerstoffmehrverbrauch der Anstieg des Herzminutenvolumens in den ersten Tagen

186—220 %, nach 10 Tagen immer noch 156—170 % beträgt, während die gleiche Arbeitsleistung in Freiburg eine Erhöhung um 130 % erbrachte.

Wenn nun die arterielle Sauerstoffsättigung immer weiter absinkt, so kann plötzlich das Herzminutenvoulmen unter den Normalwert absinken, während die Schlagfrequenz sprungweise weiter in die Höhe geht. Hier kommt es zum Versagen der Herzkraft, der venöse Blutdruck steigt stark an als Alarmsymptom der Herzinsuffizienz. Barcroft ist der Ansicht, daß die Zunahme der Pulszahl bei Anoxämie als Warnungssignal gelten müsse, wenn sie nicht einen kompensatorischen Mechanismus darstellt und wenn sie nicht mit einer Steigerung des Herzminutenvolumens verbunden ist. In Wirklichkeit ist aber die Pulsfrequenzerhöhung mit einer Steigerung des Herzminutenvolumens verbunden, sie ist abhängig vom Grade der Anoxämie, ohne daß freilich eine genaue Proportion zwischen Frequenz und Minutenvolumen besteht.

Wirkung auf die Blutverteilung.

Am wenigsten von allen am Kreislauf beteiligten Faktoren ist die Wirkung von Sauerstoffmangel und Luftverdünnung auf die Blutverteilung untersucht. Die Erscheinungen der Erweiterung der Venen, der Kapillaren der Haut und der sichtbaren Schleimhäute mit den Zeichen der Cyanose. Blutungen aus der Nase, aus den Lippen, den Augenbindehäuten und auch aus den Lungen versuchte man schon sehr frühzeitig dadurch zu erklären, daß, unter dem verminderten Luftdruck das Blut sich wie unter einem Schröpfkopf in den der Luftverdünnung unmittelbar ausgesetzten Körperteilen d. h. in der Haut, den äußeren Schleimhäuten und auch in der Lunge ansammle, was sich eben in der Blutüberfüllung der Kapillaren äußere und schließlich zu ihrer Ruptur Anlaß gebe. (Loewy). Schon A. v. Haller erklärte 1788 diese Erscheinungen auf eben diesem mechanischen Wege.

Eigentlich müßte man annehmen, daß diese Erklärung nicht ganz stimmen kann, denn bei einem Höhenaufenthalt steht ja der gesamte Körper gleichmäßig unter dem verminderten Luftdruck. Nach Jakobi können die inneren Organe z. B. durch verschiedene Elastizität der Gewebe zu einem anderen Druckverhältnis kommen und die Folge davon ist dann die Verschiebung des Blutes von den Orten höheren Druckes zu den niedrigeren Druckes, also in der Hauptsache Haut und Lungen. Dadurch wird dem übrigen Körper ein Teil des kreisenden Blutes entzogen, sodaß Sauerstoffmangel in den verschiedenen Geweben auftritt. Auch Schubert's

Gedankengänge über die Aenderungen in der Blutverteilung im Unterdruck bewegen sich in dieser Richtung Durch Störung des Gleichgewichtes zwischen den dehnenden Kräften (den der Lungenoberfläche und dem auf der Lungeninnenfläche lastenden Luftdruck) kommt es, daß die Wandspannungen der Alveolen überwiegen (zit. nach Loewy). Form- und Volumenänderung der Alveolen sind die Folge. Die elastischen Eigenschaften des Lungengewebes und die Blutfüllung sind maßgebend für den Grad der bei Luftdruckerniedrigung vor sich gehenden Veränderungen.

Der Umstand, daß eine venöse Hyperämie der Haut, sowie Haut- und Lungenblutungen nie bei Versuchen in der pneumatischen Kammer gesehen werden, läßt aber darauf schließen, daß nicht die Luftdruckabnahme allein als solche das wirksame Moment im Höhenklima ist. Nach Loewy läßt sich die Weite der Blutgefäße im Höhenklima für mittlere Höhen durch Bestrahlung erklären, in größeren Höhen ist es wohl der eintretende Sauerstoffmangel. Die Blutungen aus der Schleimhäuten erklärt Loewy durch die durch Kälte, Wind und Trockenheit verursachte Sprödigkeit der Haut, die leicht zu Einrissen und dadurch zu Blutungen führt.

In größeren Höhen kommt es zu Verschiebungen des Blutes zwischen dem großen und kleinen Kreislauf und zwar findet eine starke Blutansammlung im Lungenkreislauf statt. Margaria und Talenti schlossen aus der von ihnen gefundenen Temperatursteigerung der Ausatmungsluft unter Luftverdünnung auf diese abnorme Blutablagerung im kleinen Kreislauf.

Heger fand bei Kaninchen in Brüssel ein Verhältnis von Lungenblutmenge zum Lungengewicht von 1:15,3, auf dem Col d'Olen (2900) ein Verhältnis von 1:10,7, was eine sehr starke Blutvermehrung in den Lungen bei Luftverdünnung ausmacht. Dasselbe haben Loewy und Schrötter bei Mäusen, Kaninchen und Meerschweinchen gefunden während bei Tieren, die in sauerstoffarmer Luft untersucht wurden, die Blutfüllung der Lungen nicht so stark war.

Eine rein mechanische Wirkung der Luftverdünnung liegt also bei der Aenderung der Blutverteilung nicht vor. Einige Autoren sehen die Lungenhyperämie sogar als eine Art Stauungshyperämie, wenn auch keine sichtbaren Zeichen einer Herzschwäche vorhanden sind. Die Atmung sauerstoffarmer oder stark verdünnter Luft wirkt an sich schon vasodilatatorisch, sodaß in großen Höhen auch auf diesem Wege eine Hyperämie hervorgerufen werden kann.

Wirkung auf den Kreislauf in den Hautkapillaren.

Lüscher hat die Kreislaufverhältnisse in den menschlichen Hautkapillaren in 3450 m Höhe untersucht und sie mit denen in der Ebene verglichen, aber er fand keine wesentlichen Aenderungen. Sehr interessante Ergebnisse liegen von Liebesny über die Kapillarkreislaufänderungen in der Ebene und im Höhenklima vor. Er fand mit Hilfe des Hautmikroskopes am Nagelfalz charakteristische Unterschiede: Im Tiefland eine gleichmäßige Füllung der Hautkapillaren und eine gleichmäßige homogene Strömung. Im Hochland dagegen waren die Kapillaren ungleichmäßig gefüllt, manchmal waren Ansammlungen größerer Mengen von roten Blutzellen in Klumpen zu beobachten, durch die die Kapillaren an diesen Stellen zu ‚kapillaren Varizen' erweitert wurden. Die Strömung war verlangsamt und ungleichmäßig. Vanotti hat die Kapillarströmung und die Aenderungen des Kapillardruckes vergleichend in Zürich, auf dem Col d'Olen (2900) und auf der Punta Gnifetti (4560 m) untersucht und stellt fes, daß es schwer ist, über die reine Wirkung der Luftverdünnung etwas Genaues zu sagen, da neben dieser die veränderte Herztätigkeit, Ermüdung, Kälte und Bestrahlung am Ergebnis beteiligt sind. Er findet die Kapillaren erweitert, besonders den venösen Schenkel, während die Strömung beschleunigt war.

Aufgabe dieses Uebersichtsreferates war es, die bedeutendsten der sehr zahlreichen Untersuchungen über die mechanischen Kreislaufveränderungen im Unterdruck zusammenzufassen. Individuelle Verschiedenheit der Versuchspersonen, technische Schwierigkeiten bei den Untersuchungsmethoden und die unterschiedlichen Voraussetzungen, unter denen die einzelnen Autoren ihre Forschungen ausführten, waren verantwortlich für die Gegensätzlichkeiten in den Ergebnissen. Die Einhaltung absoluter Ruhebedingungen und die Anwendung der modernsten Untersuchungsmethoden zeigen jedoch eine gewisse Gleichmäßigkeit der Ergebnisse.

Am Schlusse meiner Arbeit gestatte ich mir, Herrn Privatdozenten Dr. K. Wezler für die Ueberlassung des Themas meinen herzlichsten Dank zu sagen. Mein ergebenster Dank gebührt Seiner Magnifizenz Herrn Rektor der Universität München Prof. Dr. Ph. Broemser für die Uebernahme des Referates.

Bacroft: Die Atmungsfunktion des Blutes. I. Teil Erfahrungen in großen Höhen (Berlin 1927).
Besserer: Das Verhalten von Pulsfrequenz und Blutdruck des Menschen bei Auf- und Abstieg in der Unterdruckkammer. Z. f. Luftfahrtmed. I. Band Heft 4.
Borgard: Analyse der im Unterdruck auftretenden Kreislaufveränderungen. Klin. Wsch. 1934 (1642).
Durig: Physiol. Ergebnisse der im Jahre 1906 durchgeführten Monte Rosa-Expedition.
Durig: Z. Biochem. 1912 Bd. 39 S. 435.
Eppinger, Kirsch, Schwarz: Das Versagen des Kreislaufes. Berlin J. Springer 1927.
Ewig-Hinsberg: Klin. Wschr. 1930 (1812)
Z. Klin. Med. 115. 732. (1931).
Gollwitzer-Meyer: Pflügers Arch. 220 S. 435 (1928).
Hartmann: Physiol. Ergebnisse der deutschen Himalayaexpedition. Z. Biol. 93. 391. 1933.
Hasselbach und Lindhard: Zur experimentellen Physiologie des Höhenklimas. Z. Biochem. 68. 308 (1915).
Herbst: Der Einfluß des Sauerstoffmangels auf den Kreislauf. Z. f. Luftfahrtmed. Band I. Heft I. Schlag- und Minutenvolumen des Herzens in großenHöhen. Luftfahrtmed. Abh. Band II. Heft 1 und 2.
Hinsberg u. Rühl: Z. klin. Med. 125. 508. 1933.
Koch: Das Verhalten des Kreislaufes in großen Höhen. Luftfahrtmed. Abh. Band I. Heft I u. II.
Loewy: Physiologie des Höhenklimas (Berlin 19322)
Lüscher: Schweiz. med. Wschr. 1928 (508 u. 778)
Matthes u. Malikio sis: Ueber das Verhalten von Kreislauf und Atmung im Unterdruck.
Z. f. Luftfahrtmed. Band I. Heft 4.
Liebesny: Wien. med. Wschr. 1921. 71.
Opitz u. Tillmann: Experimentelle Untersuchungen über das Verhalten des Blutkreislaufes und der Atmung im Unterdruck. Z. f. Luftfahrtmed. Band I, Heft 2.
Ranke: Das Verhalten der Vasomotoren und des Herzens im Unterdruck. Z. f. Luftfahrtmed. Band I, Heft 2.
Ranke u. Brömser: Z. f. Biol. Bd. 90.
Schubert: Physiologie des Menschen im Flugzeug.
Schwarz: Luftfahrtmed. Abh. Band I, Heft 1. u. 2.
Vanotti: Klin. Wschr. S. 253. (1931).
Wezler u. Böger: Z. Kreislauf-Forsch. 28 (1936) 391. 553. 760.

Lebenslauf.

Ich bin geboren am 14. November 1912 zu Deuerling in der Oberpfalz als Sohn der Hauptlehrerseheleute Georg und Käthe Weixner. In Regensburg besuchte ich das Alte Gymnasium und legte dort im Jahre 1932 die Reifeprüfung ab. Im Sommer des gleichen Jahres bezog ich die Universität München, um mich dem Studium der Medizin zu widmen. Nach 4 Semestern wechselte ich zum Studium der Zahnheilkunde über. Im Sommersemester bestand ich das Physikum und nach weiteren 4 Semestern habe ich im September-Oktober 38 das zahnärztliche Staatsexamen abgelegt. Die Approbation erhielt ich am 25. Oktober 1938.